

EVALUACIÓN AMBIENTAL Y EXERGÉTICA DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON MOTORES FUEL OÍL EN LA CENTRAL SANCTI SPÍRITUS

ENVIRONMENTAL AND EXERGY EVALUATION OF THE DISTRIBUTED GENERATION WITH FUEL OIL ENGINES IN THE CENTRAL SANCTI SPÍRITUS

Edelvy Bravo Amarante^{1}, Osvaldo Pérez Pérez², Ernesto Barrera Cardoso¹
y Zuleiqui Gil Unday¹*

¹ Centro de Estudios Energéticos y Procesos Industriales, Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez" Ave de los Mártires No 36. Sancti Spiritus, Cuba.

² Central de Generación fuel oil Sancti Spiritus Carretera Zaza Km 1. Sancti Spiritus, Cuba.

Recibido: Junio 6, 2017; Revisado: Enero 24, 2018; Aceptado: Abril 13, 2018

RESUMEN

Por la necesidad de evaluar la sostenibilidad de la generación distribuida en Cuba, con este trabajo se persigue: evaluar el impacto ambiental y la eficiencia exergética de la generación distribuida en la Central Eléctrica de Fuel oíl Sancti Spíritus. Se aplicó la metodología de Análisis del ciclo de vida a dos variantes y un balance exergético al área de generación. En el motor es donde ocurre mayor transformación de la energía. En los gases de escape de la primera variante se pierde a la atmosfera 986,32 kW lo que representa un 34,80% de la energía total que entra al motor, y en la segunda 1168,57kW el 40,39%. De igual manera en la primera variante el aprovechamiento de la energía en la generación de electricidad es de 35,29% de la energía total del fuel oíl y en la segunda 34,56%, demostrándose que la primera variante es más eficiente energéticamente. El proceso de generación es el que mayor responsabilidad tiene sobre los impactos que genera la central y la categoría de impacto sobre las que más incide es el impacto sobre la salud humana. En el proceso de generación la eficiencia exergética del producto (1 MWh) en la primera variante es de 17,60% del total de exergía suministrada y la segunda el 17,37%. La eficiencia exergética en la primera variante fue de 67,36% y en la segunda variante de 62,42%. En el aprovechamiento de los gases de escape fue de 10,91 % para la primera variante y 6,06 % para la segunda.

Palabras clave: balance de energía; balance de exergía; ciclo de vida; generación distribuida.

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Edelvy Bravo, Email: edelvybravo@gmail.com

ABSTRACT

Due to the need to evaluate the sustainability of distributed generation in Cuba, this work aims to: evaluate the environmental impact and the exergy efficiency of the distributed generation in the Fuel Power Plant Sancti Spíritus. The Life Cycle Analysis methodology was applied to two variants and an exergy balance to the generation area. In engine is where the greatest transformation of energy occurs. In exhaust gases of the first variant, 986,32 kW are expelled to atmosphere, which represents 34,80% of the total energy entering at engine, and in the second 1168,57 kW, that represents 40.39%. Likewise, in first variant, the use of energy in electricity generation is 35.29% of fuel oil total energy and in the second is 34.56%, demonstrating that the first variant is more energy efficient. The generation process has the greatest responsibility over the impacts generated by the plant and the impact category which most impact is the impact on human health. In generation process, the exergy efficiency of the product (1 MWh) in the first variant is 17.60% of the total exergy supplied, and the second variant is 17.37%. The exergy efficiency in the first variant was 67.36% and in the second variant 62.42%. In use of exhaust gases, it was 10.91% for the first variant and 6.06% for the second.

Key words: energy balance; exergy balance; life cycle; distributed generation.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad debido al incremento acelerado del consumo energético, el cual se estima que aumente en un 37% hasta el 2040 (Agency, 2014), existe una reducción de las reservas de combustible del planeta, así como un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero. Cuba no está exenta de esta problemática ya que es un país subdesarrollado con pocas reservas de petróleo y depende en gran manera de las importaciones de este según Rodríguez (2002). Es por esto que se han tomado medidas para mejorar la eficiencia del Sistema Electro energético Nacional (SEN), pues en el 2004 existía una generación base, con grandes e ineficientes plantas termoeléctricas, con 25 años de explotación como promedio, que trabajaban a un 60 % de disponibilidad, por lo que ocurrían frecuentes averías y el consumo de combustibles era muy elevado, según CEPAL (2009) y (Rodríguez y col., 2014)

En el marco del Sistema Electro energético Nacional de Cuba, la introducción de la Generación Distribuida (GD) ha significado un paso hacia el futuro que plantea ciertos retos no sólo desde el punto de vista de la operación y mantenimiento de dichas instalaciones, sino también en su posible impacto sobre el medio ambiente. Esto impone un reto grande desde el punto de vista ambiental, pues la distribución a lo largo de todo el país de cientos de instalaciones de este tipo requiere de una atención y monitoreo continuo de su operación, Pérez (2010).

La provincia de Sancti Spíritus cuenta con dos centrales eléctricas de fuel oíl, una ubicada en Trinidad, con cuatro motores de 3,85 MW y la otra localizada en el propio municipio cabecera, al norte de la ciudad, con cinco motores de 3,85 MW.

Existen herramientas para determinar estos impactos medioambientales, una de ellas es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV); método que ha ganado importancia en la gestión

medioambiental (Löfgren y col., 2011); convirtiéndose en una herramienta invaluable como soporte para la toma de decisiones ambientales (Jeswani y col., 2010), (Rodríguez y col., 2014), (Finnveden y col., 2009). En adición, el análisis exergético permite cuantificar las pérdidas de exergía en el proceso y los rendimientos exergéticos en diferentes escenarios de operación de una central de generación, Kotas (1995).

Es por ello, que este trabajo está encaminado a evaluar el impacto medioambiental y la eficiencia exergética de la generación con fuel oíl en la central eléctrica de Sancti Spíritus.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Declaración de escenarios para el estudio en la Central eléctrica

El estudio se realizó en la central eléctrica del municipio de Sancti Spíritus. Para la determinación de los escenarios (Variantes) a estudiar se consideraron situaciones reales de la operación de la central, la cual puede trabajar de diferentes formas acorde a la necesidad de generación que exista en cada momento en el país. La planta está diseñada para trabajar de forma óptima con sus 5 motores y un factor de carga superior al 85%, esta es la variante de generación más correcta, pero debido a causas externas e internas, se opera en otro escenario, en el cual se genera con tres motores solamente, y solo uno de ellos con caldera acoplada para la generación de vapor a todos los procesos, esta variante es la más crítica posible. Según las características del proceso productivo este se clasificó en cuatro procesos fundamentales (ver Figura 1), estas se clasifican de la siguiente manera:

El proceso 1, Comprende la recepción, el almacenamiento y tratamiento del combustible (fuel y aceite); el proceso 2, Generación; el proceso 3, Las calderas de vapor y el proceso 4, La Planta de tratamiento residual.

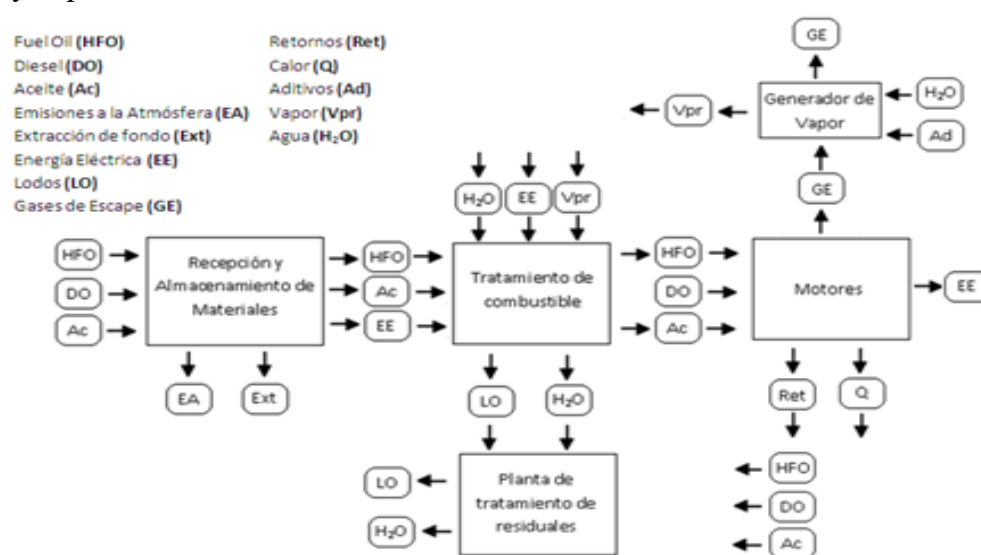


Figura 1. Flujos en los procesos de generación central eléctrica fuel oíl

2.2 Evaluación del impacto ambiental y análisis exergético

Se utilizó la herramienta Análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental de cada escenario. Para ello se asumió el enfoque “de la puerta a la puerta”

(Finnveden y col., 2009), teniendo en cuenta desde la entrada de todos los materiales a la central, hasta que se entrega 1 MW en el banco de transformadores.

2.2.1 Definición y alcance de los objetivos

El alcance de este estudio incluye la evaluación del impacto ambiental generado por los diferentes procesos que dentro de la Central eléctrica para generar 1 MWh (Figura 1).

2.2.2 Unidad funcional

Se utilizó como unidad funcional: la generación de 1 MWh.

2.2.3 Objetivo

El objetivo del ACV, en este caso fue evaluar el impacto ambiental asociados al proceso de generación de electricidad con fuel oíl en la provincia de Sancti Spíritus.

2.2.4 Inventario del ciclo de vida

En el análisis del inventario se recolectaron datos reales de la operación de la Central y fueron procesados para calcular los flujos de entrada y salida a los límites del sistema. Se utilizó el software Open LCA con la metodología Recipe y la base de datos Ecoinvent 99. La determinación de los flujos de materiales y energías considerados en los inventarios se calculó según los balances de masa y energía para cada proceso que tiene lugar en la central eléctrica.

2.3 Análisis exergético

El objetivo del análisis exergético es evaluar la eficiencia exergética de un proceso, esta se define como la relación entre la exergía aprovechada en el producto o proceso (EP) y la exergía suministrada al proceso (EF) (Rosen, 2012), ecuación (1), (Federico y col., 2013).

$$\eta_{exergy} = \frac{\sum E_{outlet}}{\sum E_{inlet}} \quad (1)$$

El balance exergético de un material depende de las siguientes componentes, exergía cinética, potencial, física, y química y se escribe de la siguiente forma:

$$ex = exk + exp + exp h + exch \quad (2)$$

Se definió como ambiente de referencia una temperatura de ($T_o = 298,15K$), presión ($P_o = 1atm$) y composición química del ambiente natural, Szargut (1999).

La exergía química de las sustancias se encuentra tabulada, Szargut (1999) y (Song y col., 2011).

La exergía física se define por la siguiente ecuación:

$$exf = (h_i - h_o) - T_o * (S_i - S_o) \quad (3)$$

Los términos ($h_i - h_o$) y ($S_i - S_o$) son las variaciones de entalpía y entropía.

Para la determinación de la exergía química de los hidrocarburos líquidos existe un método de cálculo, el cual emplea un coeficiente β , este depende de la composición química del compuesto, en este caso el fuel oíl y sus componentes hidrógeno y carbono (Dincer y Rosen, 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comportamiento energético en la Central eléctrica

La central eléctrica no tiene un comportamiento estable en la generación de electricidad, esta varía de un mes a otro así mismo de un año a otro. En los años tomados como referencia para el estudio (2012-2014), existen diferentes índices de consumo de combustible por MWh generado para cada uno de los meses por lo que tiene una correspondencia directa con la generación (Figura 2). El año 2014 es el más afectado en cuanto a la generación.

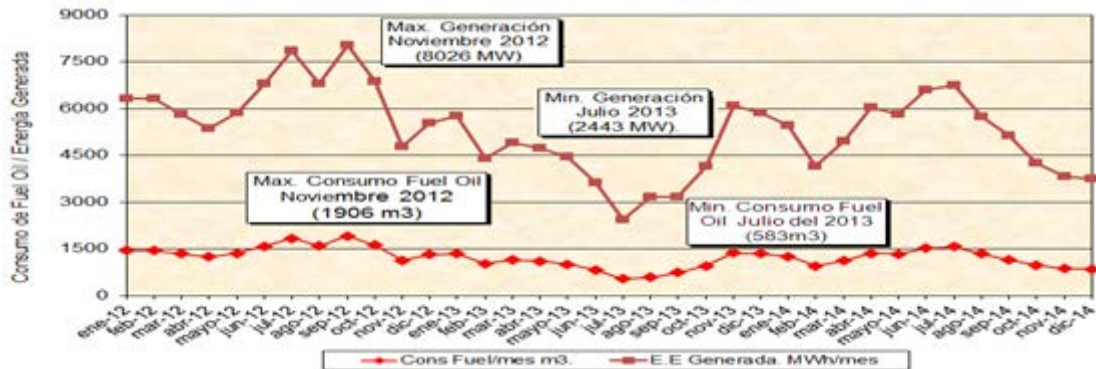


Figura 2. Consumo de fuel oil y energía eléctrica generada en el periodo 2012 al 2014

El promedio del factor de carga de los motores en el periodo analizado, año 2012 al 2014 es 80%, y el índice de consumo promedio correspondiente a este periodo es 211,04 g/kWh.

3.1.2 Balance de energía para el proceso de generación

En el proceso de generación es donde mayor transformación de la energía existe, ya que es el proceso principal de la planta.

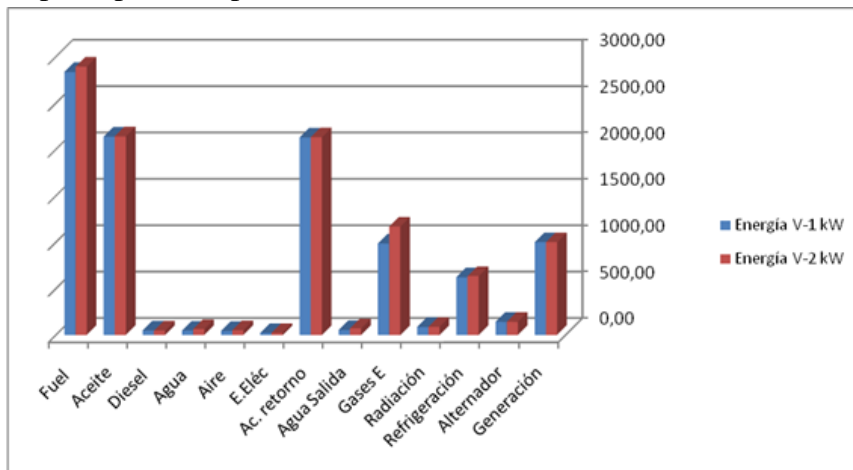


Figura 3. Energías en el proceso de Generación en ambas variantes 5 motores (V-1) y 3 motores (V-2) al 80%

En la salidas se observa que los gases de escape de la primera variante tiene una pérdida de energía que deja escapar a la atmósfera de 986,32 kW lo que representa un 34,80% de la energía total que entra al motor en el combustible fuel oil, en la variante 2 existe una pérdida en los gases de escape de 1168,57kW de energía el 40,39% del total de la energía que entra en el fuel oil, esto da la medida del aprovechamiento de la energía en

cada variante para generar la misma potencia, esto se traduce en eficiencia en la combustión de cada una de las variantes principalmente por el estado a que entra el combustible al motor.

De igual manera la primera variante aprovecha mayormente la energía en la generación de electricidad siendo esta el 35,29% de la energía total del fuel oil y en la segunda solo el 34,56% de este, por lo que se aprecia mayor eficiencia energética en la primera variante.

3.2 Evaluación del impacto ambiental según el ACV

Para evaluar el ciclo de vida de la generación con fuel oil se empleó el software Open LCA, y se analizaron los cuatro procesos fundamentales en la central: recepción, pretratamiento del fuel oil y el aceite, generación y la etapa de tratamiento de residuales. Se analiza en cada una de los procesos las categorías de impacto sobre el ecosistema, salud humana y el impacto sobre los recursos.

3.2.1 Impacto ambiental en el proceso de recepción, pre tratamiento materiales, y tratamiento de residuales

En estos tres procesos los resultados por cada una de las categorías de impacto que brinda el software, muestran resultados similares, siendo las categorías intermedias de daños (impacto sobre el ecosistema) la de cambio climático, y la transformación natural del suelo, y para (impacto sobre la salud humana) el cambio climático y la formación de partículas, esto coincide con lo reportado por (Rodríguez y col., 2014) utilizando la metodología ECO-SPEED. En el caso del impacto sobre los recursos en los tres procesos la categoría de daño intermedio más representativa es la pérdida de los recursos fósiles.

3.2.2 Impacto ambiental en el proceso de generación de electricidad

Dentro del impacto en ambas variantes sobre el ecosistema tiene mayor incidencia el impacto sobre el cambio climático, la transformación de la tierra, y la acidificación terrestre (Figura 4).

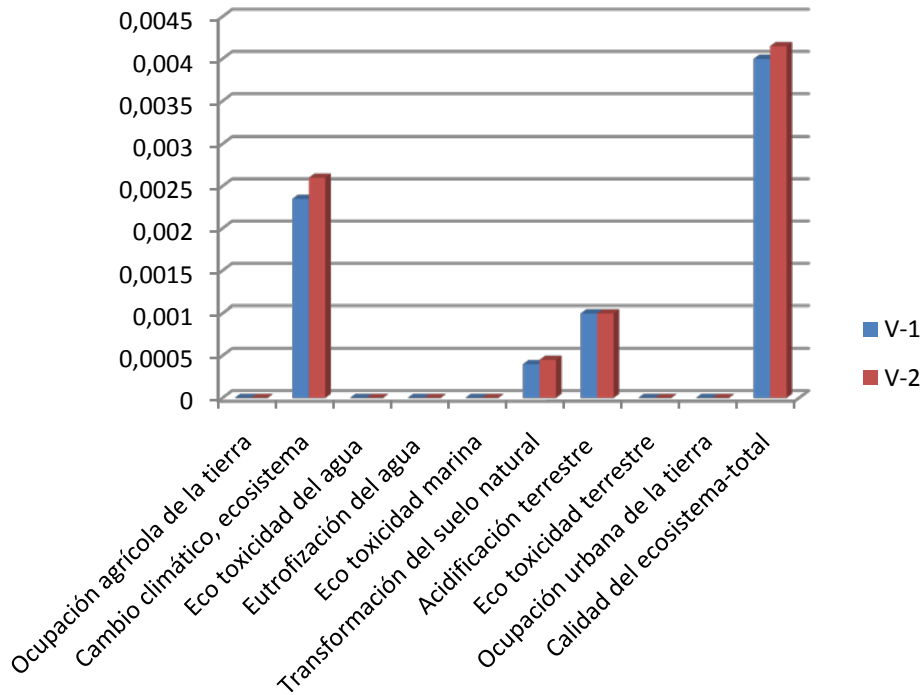


Figura 4. Impacto de la generación sobre el ecosistema, variante 1 y variante 2

La generación de 1 MWh en cada una de las variantes analizadas tiene un impacto sobre la salud humana, principalmente las categorías formación de partículas y el impacto del cambio climático, en ambas variantes estas son las categorías que causan un mayor impacto, y la segunda variante es mayor que la primera en ambos casos (Figura 5).

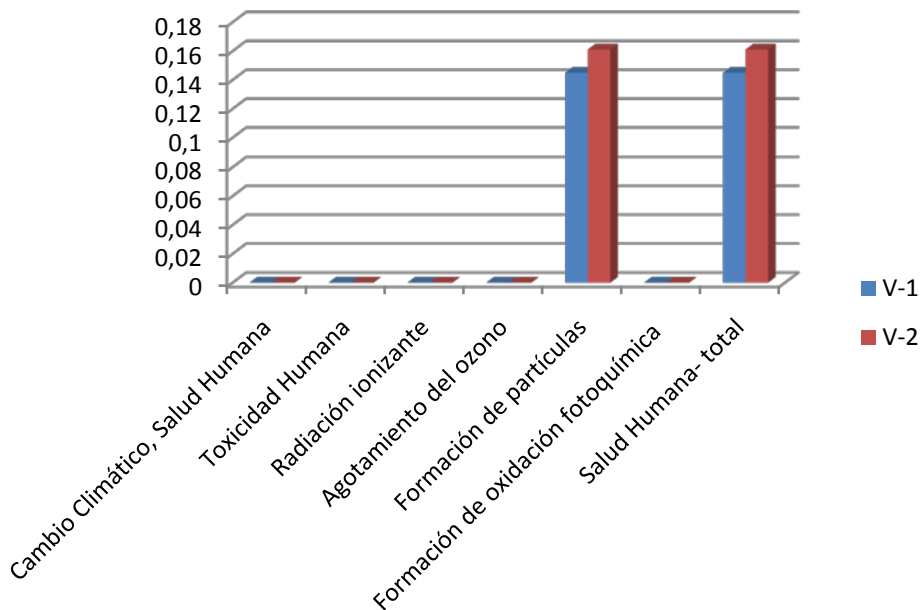


Figura 5. Impacto en la etapa de generación sobre la salud humana variante 1 y variante 2

El proceso de generación tiene un impacto sobre los recursos, los mayores valores se obtienen para la categoría agotamiento de recursos fósiles, lo cual resulta lógico pues el principal consumo para generar electricidad es fuel oil, por lo que se va agotando cada

vez más este recurso y como se muestra es mayor el impacto en la segunda variante que en la primera, (Figura 6).

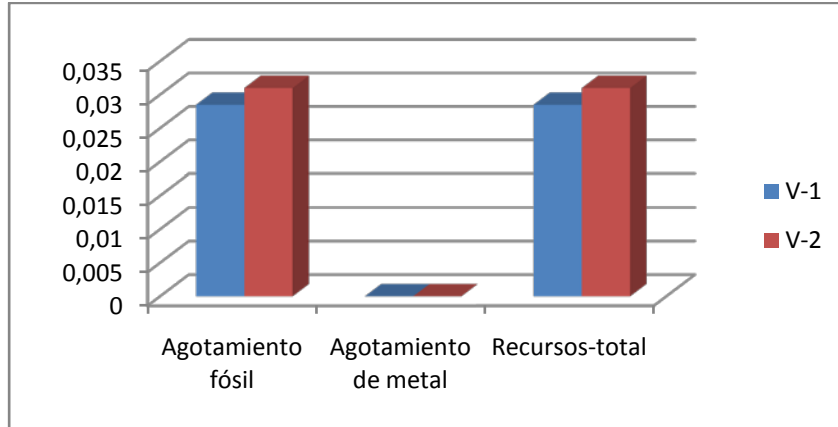


Figura 6. Impacto en la etapa de generación sobre los recursos variante 1 y variante 2

El impacto sobre el medio ambiente se puede reducir, si se estabiliza la generación de electricidad en los factores de potencia establecidos superior al 85% y siempre que se pueda con los motores necesarios.

3.3 Análisis exergético

El análisis exergético se realizó a la etapa de generación ya que es en este donde se producen los mayores impactos ambientales y encontrarse en esta etapa las pérdidas de exergía por las irreversibilidades del proceso de combustión, Kumar (2017).

3.3.1 Flujos exergéticos presentes en la etapa de generación

Los mayores valores de exergía de entrada corresponden al fuel, aceite y aire, ya que son los volúmenes de masas mayores que entran al motor, en la salida tiene el valor mayor de exergía el aceite de retorno, este aunque disminuye su valor por la pérdida de masa, en realidad incrementa en un 3,26% su exergía, por la transferencia de calor con las partes más calientes del motor (Figura 7).

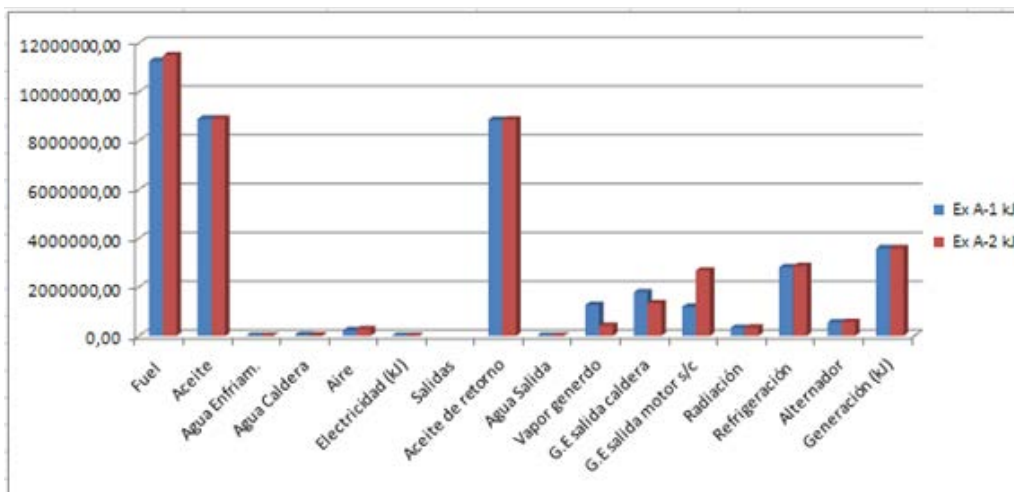


Figura 7. Valor de las exergías de entrada y salida en el proceso de generación para la variante 1 y variante 2

3.3.2 Eficiencia exergética del producto final

Con la primera variante se logra aprovechar con mayor eficiencia la exergía que entra en el proceso para generar 1MWh de potencia, hasta valores de 17,60%, mientras que con la segunda variante se logra valores de eficiencia de 17,37%. Lo anterior demuestra que cuando se opera la Central por debajo de sus parámetros óptimos de operación se pierde exergía en el proceso por cada MWh generado (Figura 8).

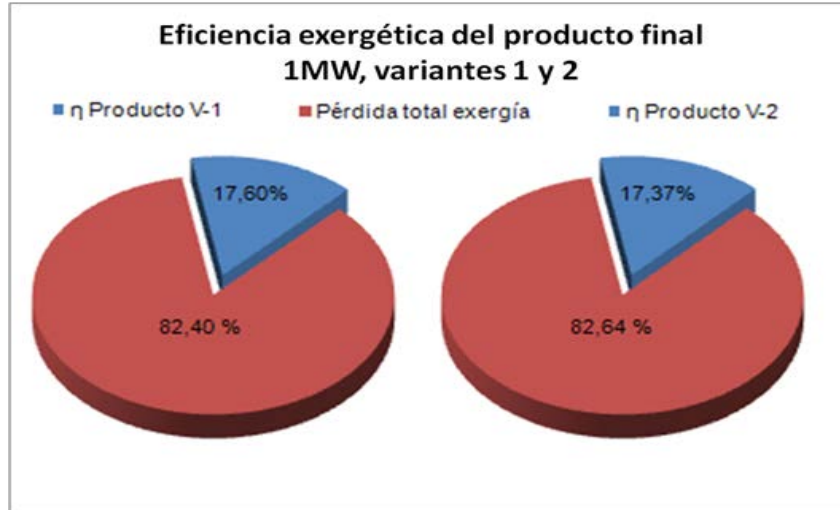


Figura 8. Eficiencia exergética del producto final 1MW, variantes 1 y 2

3.3.3 Eficiencia exergética del proceso de generación y de la generación de vapor

En el proceso de generación la eficiencia exergética en la primera variante tiene un valor de 67,36% y en la segunda variante 62,42% (Figura 9). Esto indica que cuando se opera la Central con tres motores y uno solo con caldera recuperadora se destruye un 4,94 % de la exergía que entra en el sistema comparado si se opera según los parámetros de diseño. Además el valor de la eficiencia exergética de las calderas es para ambas variantes 71,85%, en este cálculo no se consideró restarle la exergía del agua de alimentación en las calderas, pues tiene un valor de exergía que no es producido en ella, ya que no es alimentada a temperatura ambiente, sino entre 80 y 88°C (Figura 9).

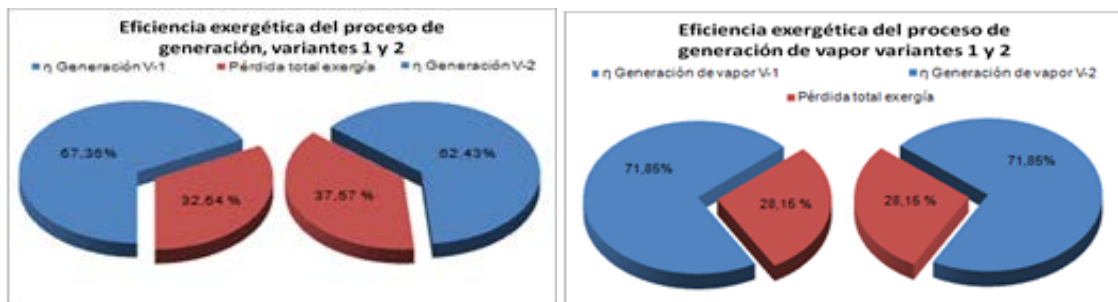


Figura 9. Eficiencia exergética del proceso de generación y de la generación de vapor, variantes 1 y 2

3.3.4 Aprovechamiento global de la exergía de los gases de escape

Si se tiene en cuenta que ambas variantes dejan de aprovechar la exergía de los gases de escape de dos motores, el aprovechamiento de la exergía total de los mismos es muy inferior a la eficiencia exergética en las calderas recuperadoras (Figura 10). De la exergía contenida en los gases de escape considerando que siempre bajo cualquier

régimen de operación se deriva directamente a la atmósfera la exergía de los gases de dos motores y solo se aprovecha el de tres motores que tienen acopladas carderas recuperadoras, solo se aprovecha el 18,19% del potencial exergético existente en los mismos. Si se analizan los regímenes de operación de las dos variantes estudiadas, el aprovechamiento global de esta exergía es 10,91 % para la primera y de 6,06 % para la segunda. Lo que demuestra que por problemas de operación se pierde más de un 4% de la exergía contenida en los gases de escape.

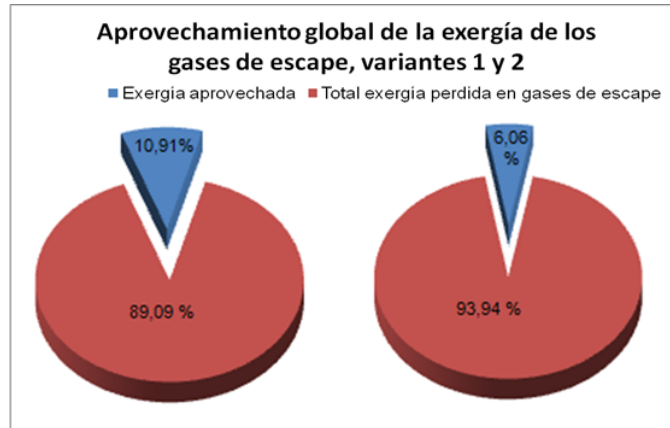


Figura 10. Aprovechamiento global de la exergía de los gases de escape, en las variantes 1 y 2

4. CONCLUSIONES

Se puede concluir que la inestabilidad en la operación de la Central, tanto por problemas de mantenimiento como por respuestas a demandas del Sistema eléctrico Nacional deterioran los indicadores energéticos, los exergéticos y como consecuencia se incrementan los impactos ambientales.

1. En los gases de escape de la primera variante analizada se pierde a la atmósfera 986,32 kW lo que representa un 34,80% de la energía total que entra al motor, en la variante 2 se pierden 1168,57kW el 40,39% del total de la energía.
2. En la primera variante el aprovechamiento de la energía en la generación de electricidad es de 35,29% de la energía total del fuel oil y en la segunda solo el 34,56% de este, por lo que se aprecia mayor eficiencia energética en la primera variante.
3. A través del Análisis de Ciclo de Vida se determinó que el proceso de generación es el que mayor responsabilidad tiene sobre los impactos que genera la central y la categoría de impacto sobre las que más incide es el impacto sobre la salud humana y que la segunda variante es la que alcanza mayores impactos en cada una de las categorías.
4. El proceso de generación la eficiencia exergética del producto (1 MW) en la primera variante es de 17,60% del total de exergía suministrada y la segunda el 17,37%. La eficiencia exergética en la primera variante tiene un valor de 67,36% y en la segunda variante 62,42%. También se determinó el aprovechamiento de los gases de escape siendo el 10,91 % para la primera variante y 6,06 % para la segunda.

REFERENCIAS

- Agency, I.E., World Energy Outlook., 2014, pp. 1-10.
- CEPAL., Comisión Económica para América Latina y el Caribe., Situación y perspectivas de la eficiencia energética en América Latina y El Caribe, 2009, pp. 294.
- Dincer, I., & Rosen, M.A. Exergy. Chemical exergy, 2nd ed., 2012, pp. 31–49. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097089-9.00003-6>.
- Federico, C., Hincapié, Á., Iván, H., and Arredondo, V., Exergía en sistemas biológicos: Aproximación holística para el estudio de ecosistemas y el manejo ambiental., Producción + Limpia, Vol. 8, No. 2, 2013, pp. 106–128.
- Finnveden, G., Hauschild, M., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Köhler, A., Pennington, D. and Sangwon, S., Journal of Environmental Management, Vol. 91, No. 1, 2009, pp. 1-21.
- Gámez, M.R., Pérez, A.V., Fernández, M.C., & Llanes, M.V., Aplicaciones industriales. Sistemas fotovoltaicos y la ordenación territorial, Ingeniería Energética, Vol. XXXIV, No. 3, 2013, pp. 247–259.
- Jeswani, H., Azapagic, A., Schepelmann, P., and Ritthoff, M., Options for broadening and deepening the LCA approaches., Journal of Cleaner Production, Vol. 18, No. 2, 2010, pp. 120–127.
- Kotas, T., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis., Krieger Publishing Company, 1995, Florida, pp. 55-68.
- Kumar, R., A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants., Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 20, No. 1, 2017, pp. 283–292.
- Löfgren, B., Tillman, A., and Rinde, B., Manufacturing actor's LCA., Journal of Cleaner, Vol. 19, No. 17-18, 2011, pp. 2025-2033.
- Pérez, I., Rodríguez, M., & Vázquez, A., Gestión de la información de la generación distribuida en Cuba con un sistema de información geográfica., Memorias XV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Palacio de las Convenciones de Cuba, La Habana, 2010.
- Rodríguez, S., Evolución y cambios en el Sector Energético de Cuba en los años noventa., Momento Económico, Vol. 121, No. 121, 2002, pp. 60–72.
- Rodríguez, B., Fernández, M., y Fernández, N., Análisis del ciclo de vida de la generación distribuida en Cienfuegos., Ingeniería Energética, Vol. 35, No. 3, 2014, pp. 274–285.
- Song, G., Shen, L., y Xiao, J., Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data., Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 50, No. 16, 2011, pp. 9758–9766.
- Szargut, J., Exergy in the Thermal Systems Analysis. In: Bejan A., Mamut E. (eds) Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems. NATO Science Series (Series 3. High Technology), Vol. 69, Springer, Dordrecht, 1999, pp. 69-82.